

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 特 許 公 報 (B 2)

(11) 特許番号

特許第3307936号
(P3307936)

(45) 発行日 平成14年 7 月29日 (2002. 7. 29)

(24) 登録日 平成14年 5 月17日 (2002. 5. 17)

(51) Int.Cl.⁷

G 0 6 T 7/00

識別記号

5 1 0

F I

G 0 6 T 7/00

5 1 0 D

請求項の数22(全 21 頁)

(21) 出願番号 特願平6-509930

(86) (22) 出願日 平成 4 年10月10日 (1992. 10. 10)

(65) 公表番号 特表平8-504979

(43) 公表日 平成 8 年 5 月28日 (1996. 5. 28)

(86) 国際出願番号 P C T / U S 9 2 / 0 8 6 7 3

(87) 国際公開番号 W O 9 4 / 0 9 4 4 6

(87) 国際公開日 平成 6 年 4 月28日 (1994. 4. 28)

審査請求日 平成11年 9 月21日 (1999. 9. 21)

前置審査

(73) 特許権者 501439024

アイリスキャン・インコーポレーテッド
アメリカ合衆国、ニュージャージー州
08054、マウント・ローラル、キュー・
ゲイサー・ドライブ 133

(72) 発明者 ドーグマン、ジョン・ジー

イギリス国、ビーイー18・9 ジェイエック
クス、ケンブリッジシャー、ハンティン
ドン、フェンスタントン、ベル・レーン
9

(74) 代理人 100058479

弁理士 鈴江 武彦 (外 2 名)

審査官 小林 勝広

(56) 参考文献 特表 昭62-501889 (J P, A)

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 虹彩解析に基づく生体測定学的人物識別システム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】 目の虹彩の正体測定学的解析によって特定
の人間を独特に識別する方法において、
識別されるべき人間の目のイメージを獲得し、
イメージ内で目の虹彩を分離して決定し、
虹彩を解析して、提供する虹彩コードを発生し、
前に発生された基準虹彩コードと前記提供されたコード
を比較して、前記提供されたコードと前記基準コードと
の間の類似性の尺度を発生し、
前記虹彩コードが同じ虹彩から生じたか否かの決定事項
に前記類似性尺度を変換するステップを含み、
前記分離して決定するステップは、
イメージの虹彩と瞳孔部分の間の円形の瞳孔境界を決定
し、瞳孔の境界と必ずしも中心を共有するとは限らない
弧を使用して、イメージの虹彩と強膜部分との間の別の

円形の境界を決定し、

分離された虹彩イメージ上で極座標系を設定し、座標系
の原点が円形の瞳孔境界の中心であり、ここにおいて、
半径座標が前記円形の瞳孔境界と、虹彩と強膜との間の
前記円形の境界との間の距離のパーセンテージとして測
定され、

虹彩イメージ内において複数の環状解析帯域を限定する
ステップを含んでいる方法。

【請求項 2】 さらに、決定事項に対する信頼性レベルを
計算するステップを含んでいる請求項 1 記載の方法。

【請求項 3】 前記解析帯域は、まぶた、まつげによって
妨害されるような虹彩イメージのある予め選択された部
分、または照明器具からの鏡面反射を除外する請求項 1
記載の方法。

【請求項 4】 前記虹彩を解析して虹彩コードを発生する

ステップは、前記環状解析帯域内に存在する虹彩イメージの部分解析し、信号処理手段を使用して前記虹彩イメージ部分に対する虹彩コードを発生するステップを含んでいる請求項1記載の方法。

【請求項5】前記信号処理手段は、マルチスケールの自己類似的な2次元直角位相バンドパスフィルタを極座標で虹彩イメージに適用する請求項4記載の方法。

【請求項6】前記虹彩コードは、固定された数のビットおよび全ての虹彩に対して普遍的なフォーマットを有している請求項5記載の方法。

【請求項7】前記信号処理手段は、輝度バイアスを除去

$$\text{MSBRe}(r, \theta) = \begin{cases} 1 & \text{if } \text{Re} \int_{\rho} \int_{\phi} e^{-2\pi i \omega(\theta - \phi)} e^{-(r - \rho)^2 / \alpha^2} e^{-(\theta - \phi)^2 / \beta^2} I(\rho, \phi) \rho d\rho d\phi > 0 \\ 0 & \text{if } \text{Re} \int_{\rho} \int_{\phi} e^{-2\pi i \omega(\theta - \phi)} e^{-(r - \rho)^2 / \alpha^2} e^{-(\theta - \phi)^2 / \beta^2} I(\rho, \phi) \rho d\rho d\phi \leq 0 \end{cases}$$

$$\text{MSBIm}(r, \theta) = \begin{cases} 1 & \text{if } \text{Im} \int_{\rho} \int_{\phi} e^{-2\pi i \omega(\theta - \phi)} e^{-(r - \rho)^2 / \alpha^2} e^{-(\theta - \phi)^2 / \beta^2} I(\rho, \phi) \rho d\rho d\phi > 0 \\ 0 & \text{if } \text{Im} \int_{\rho} \int_{\phi} e^{-2\pi i \omega(\theta - \phi)} e^{-(r - \rho)^2 / \alpha^2} e^{-(\theta - \phi)^2 / \beta^2} I(\rho, \phi) \rho d\rho d\phi \leq 0 \end{cases}$$

にしたがってフィルタ出力の最大桁ビットを計算することによって“1”または“0”として定められている請求項7記載の方法。

【請求項9】全ての対応したビット間の基本的な排他的オア論理動作を計算することによって任意の2つの虹彩コードを比較し、

結果的な2進ベクトルの二乗されたノルムを計算するステップを含み、この比較尺度は、2つの虹彩コードベクトル間のハミング距離として定められる請求項8記載の方法。

【請求項10】さらに、提供された対象の頭部の可能性のある傾斜または周期的両眼共同運動（すなわち、トーションアルローテーション）を補償するため、角度的軸に沿って虹彩コードのいくつかの異なる相対的シフトについて比較ステップを反復する請求項9記載の方法。

【請求項11】前記計算ステップは、2つのコードが同じ虹彩、したがって同一人物から生じた計算された尤度前記ハミング距離を変換するステップを含んでいる請求項10記載の方法。

【請求項12】前記計算された尤度は、コードが独立である場合、すなわち別々の虹彩から生じた場合に、提供されたコードと基準コードのビットの観察された一致部

するため、間接照明から生じている緩やかな輝度傾斜を除去するため、雑音を除去するため、およびエーリアシングを阻止するために原虹彩イメージ信号の領域に前記バンドパスフィルタを適用するステップを含んでいる請求項6記載の方法。

【請求項8】虹彩コード中の各ビットの値は、所定の位置における所定の寸法の前記フィルタに対してサポートを構成する虹彩のどのような領域に対してでも、以下の定義：

【数1】

分が偶然に一致する確率を計算することによって発見される請求項11記載の方法。

【請求項13】測定されたハミング距離は、2つの前記虹彩コードが同じ目のものである確率に変換され、予め選択された基準は前記測定されたハミング距離に適用されて、“イエス”または“ノー”決定を発生し、決定に関する信頼レベルは計算された確率によって与えられる請求項12記載の方法。

【請求項14】前記円形の瞳孔境界は、式：

【数2】

$$\max_{(r, x_0, y_0)} \left\| \frac{\partial}{\partial r} \int_{r, x_0, y_0} I(x, y) ds \right\|$$

によって定められ、ここで r は前記境界の半径であり、 x_0 および y_0 は中心座標であり、 I はイメージ強度であり、

前記半径および中心座標は予め選択されたパターンで変化する請求項13記載の方法。

【請求項15】イメージの虹彩と強膜部分との間の前記別の円形の境界は、式：

【数3】

$$\max_{r \in [1.5r_0, 10r_0]} \left\| \frac{\partial}{\partial r} \int_{\rho=r-\delta}^{r+\delta} \frac{2}{\pi \delta} \int_{\theta=\phi-\pi/8}^{\phi+\pi/8} I(\rho, \theta) \rho d\rho d\theta \right\|$$

にしたがって前記座標系の原点から左および右の縁までの距離を決定することによって定められ、ここにおいて r は前に決定された瞳孔の半径であり、 δ は半径シェル

距離であり、 $I(\rho, \theta)$ は極座標における元のイメージ強度であり、 ϕ は3時または9時経線における縁をそれぞれ発見するために0または π に等しい請求項14記載

の方法。

【請求項16】前記解析帯域は前記瞳孔の周囲に完全に延在する複数の環状帯域と、ほぼ45°の極座標角度から135°までおよび225°から315°まで前記瞳孔の周囲に延在する複数の半環状帯域とを含んでいる請求項15記載の方法。

【請求項17】前記解析帯域は、前記瞳孔境界から予め選択された部分距離で配置された内部ポイントから前記

$$G(r, \theta) = e^{-2\pi i \omega (\theta - \theta_0)} e^{-(r-r_0)^2/\alpha^2} e^{-(\theta - \theta_0)^2/\beta^2}$$

にしたがって極座標において定められ、ここで r は半径であり、 θ は半径の角度距離であり、 ω は周波数であり、 α および β は定数である請求項18記載の方法。

【請求項20】前記虹彩コードは2048ビットから成る請求項19記載の方法。

【請求項21】前記円形の瞳孔境界は式：

【数5】

$$\max_{(r, x_0, y_0)} \left| \frac{\partial}{\partial r} \int_{r, x_0, y_0} I(x, y) ds \right|$$

$$\max_{r \in [1.5r_0, 10r_0]} \left| \frac{\partial}{\partial r} \int_{\rho=r-\delta}^{r+\delta} \frac{2}{\pi \delta r} \int_{\theta=\phi-\pi/8}^{\phi+\pi/8} I(\rho, \theta) \rho d\rho d\theta \right|$$

にしたがって前記座標系の原点から左および右の縁までの距離を決定することによって定められ、ここにおいて r_0 は前に定められた瞳孔の半径であり、 δ は半径シェル距離であり、 $I(\rho, \theta)$ は極座標における元のイメージ強度であり、 ϕ は3時または9時の経線における縁をそれぞれ発見するために0または π に等しい請求項21記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【発明の背景】

本発明はパーソナル識別分野、特に生体測定学的指標による人間の自動識別に関する。

人間の識別は、人類自身と同じくらい古くからの目的である。現代は技術およびサービスが開発されてきているため、迅速で信頼性の高い識別が要求される人間活動および業務が増加している。例として、一般にパスポート制御、コンピュータ論理制御、銀行の現金自動預金支払い機およびその他の業務承認、構内アクセス制御およびセキュリティシステムが含まれる。このような識別努力は全て速度、信頼性および自動化を共通の目的とする。

識別のために生体測定学的指標を使用するには、特定の生体測定学的要因が各個人にとって独特であり、それが容易に測定され、また経時的に不変であることが必要である。多数の指標が長年にわたって提案されきたが、恐らく指紋が成功した生体測定学的識別方式の最も一般的な例である。良く知られているように、同じ指紋は2つとなく、それらは負傷または外科手術による以外に変

縁から予め選択された部分距離で配置された外部ポイントまで等しい部分的な半径距離で間隔を隔てられている請求項16記載の方法。

【請求項18】前記バンドパスフィルタは2-Dガボールフィルタである請求項16記載の方法。

【請求項19】前記2-Dガボールフィルタは式：

【数4】

によって定められ、ここで r は前記境界の半径であり、 x_0 および y_0 は中心座標であり、 I はイメージ強度であり、前記半径および中心座標は、前記定められた式において最大値を発見するために反復的な上り傾斜によって組織的に変化される請求項1記載の方法。

【請求項22】イメージの虹彩と強膜部分との間の前記別の円形の境界は、式：

【数6】

化しない。しかしながら、指紋による識別にはその人物との物理的な接触が必要とされるという大きい欠点があることが同様に明らかである。離れて指紋を獲得する方法は存在せず、またこのような方法は現れそうにない。

技術的にほとんど注目されていなかった生体測定学的指標は虹彩である。全ての人間の目の虹彩は、高度に複雑な特有の組織を有し、これは人間の一生にわたって本質的に不変であることが判明している。同じ人物でさえ、両虹彩の組織またはディテールは同じではない。目の内部器官として、虹彩は外部環境から完全に保護されているが、目の白色組織によって包囲された目の角膜の透明な保護窓の背後の着色されたディスク状のものとして数ヤード離れたところからでも容易に見ることができる。虹彩は光に応答して瞳孔の寸法を調節するために伸長および収縮するが、その精細な組織は伸長および収縮を除けばほとんど変わらない。このような組織における歪みは、虹彩イメージを数学的に解析するのに容易に補正され、広範囲にわたる瞳孔の拡張に対して同じ状態である虹彩サインを抽出して、符号化することができる。虹彩組織の濃さ、特有性および不変性、並びにその外部からの可視性が、虹彩を自動化された高度に信頼できる人物識別に適したものにする。虹彩の記録および識別は、物理的に接触せずにビデオカメラを使用して自動的におよび目立たずに行われることが可能である。

それと比較すると、署名、写真、指紋、声紋および網膜血管パターン等のその他の生体測定学の全てが重大な欠点を有している。サインおよび写真は入手し記憶するの

が安価で容易であるが、自動的に確実に識別することは不可能であり、また偽造され易い。電氣的に記録された声紋は人物の声の変化に影響を受け易く、偽造されることができる。指紋または手形は物理的な接触を必要とし、それらもまた偽造されることができ、人工物によって傷付けられる。

虹彩識別は、網膜識別とは混同されない。虹彩は見易く、ビデオカメラにより容易にイメージ化されることができる。反対に、網膜は眼球内に深く隠されており見え難い。小さい瞳孔または白内障等の普通の状態は、網膜を見え難くするか、或は見ることを不可能にするが、それらは虹彩の可視性に影響を与えない。

人物識別システムに虹彩のこれらの好ましい特性を利用する唯一の従来の試みは、FlomおよびSafir氏による米国特許第4,641,349号明細書に記載されている。この特許出願には、識別方法として虹彩を使用した一般的な概念が記載されているが、このようなシステムの開発された実施例は示されていない。虹彩の位置および寸法にかかわらずイメージ内の虹彩を発見し分離する自動的な手段、並びにその組織を抽出し、符号化する手段は記載されていない。さらに上記の特許出願には、特徴のリストが編集されてしまった後の識別決定を計算する方法が示されていない。一般に2つの虹彩イメージからの特徴のリストは、それらが同じ虹彩から生じたものであるか否かにかかわらず、部分的に一致し、部分的に一致しない。一般に、このようなリストはまたそれらが含んでいる特徴の数で異なっている。不適当なデータセット間におけるこのような比較に基づいて決定を行う理論的および数学的な公式は存在しない。さらに、識別と関連した信頼性レベルを計算する方法は記載されていない。

【発明の要約】

本発明の一般的な目的は、いずれかの目の虹彩に基づいて人物を識別するシステムを提供することである。

本発明の別の目的は、信頼性が非常に高く、ほぼ1秒で迅速に人物を識別するシステムを提供することである。

本発明のさらに別の目的は、客観的および厳格な基準で任意の識別決定用の信頼性レベルを計算する識別システムを提供することである。

本発明の別の目的は、対象から作用を受けずに、また対象と物理的に接触せずに識別を行う識別システムを提供することである。

本発明のさらに別の目的は、本物の生きている対象と生きているのではない複製の識別手段を使用した偽者とを区別することを可能にする識別システムを提供することである。

これらおよびその他の目的は、特定の人間を独特に識別する方法によって本発明において達成され、このステップは以下のステップを含む。最初に、システムは識別されるべき人間の目のデジタル化されたイメージをビデオ

カメラによって獲得する。次に、それはイメージ内に存在している場合に虹彩を分離し、瞳孔の境界と必ずしも中心の一致しない弧を使用して、イメージの虹彩と強膜部分との間の円形の瞳孔境界を限定する。本発明のシステムは、分離された虹彩イメージ上に極座標系を設定し、座標系の原点は円形の瞳孔の境界の中心である。その後、それは虹彩イメージ内において複数の環状の解析帯域を決定し、これらの解析帯域は、瞼、睫または照明器具からの鏡面反射によって妨害される可能性のある虹彩イメージのある予め選択された部分を除外する。

これらの環状の解析帯域内にある虹彩イメージの部分は、極座標中に直角位相バンドパスフィルタのマルチスケールの自己類似的なセットを含む特別の信号処理手段を使用して解析およびコード化され、全ての虹彩に対して普遍的なフォーマットを有する固定した長さの虹彩コードを生成する。結果的なコードは基準コードとして記憶される。このような全ての虹彩コードの普遍的なフォーマットおよび長さのために、異なる虹彩コード間の比較は非常に効果的で簡単である。特に、任意の2つの虹彩コード間の比較は、全てのそれらの対応したビット間の基本的な論理XOR（排他的オア論理動作）を計算し、その後結果的な2進ベクトルのノルムを計算することによって達成される。この比較尺度はまた2つの虹彩コードベクトル間のハミング距離として説明されることができる。虹彩コードの普遍的なフォーマットはまた個人の同一性を決定するために記憶された基準虹彩コードの大きいデータベースにおける迅速な並列探索を可能にする。

システムは、基準コードを使用して識別を行うために、供給、限定、決定、設定、ディスクライブおよび解析ステップにしたがって識別対象から識別コードを生成する。その後、システムは基準コードと識別コードを比較して、コード間のハミング距離を確認する。その後、2つのコード中のビットの観察された一致部分が、2つのコードが独立していたなら偶然一致する確率を計算することによって、この距離から2つのコードが同じ虹彩から、したがって同じ人物から生じた尤度が計算される。この測定されたハミング距離に適用される予め選択された基準は、“イエス”または“ノー”決定を発生し、決定に対する信頼性レベルは計算された確率によって与えられる。

本発明のこれらおよびその他の目的は、本発明を特徴付ける新規性の種々の特徴と共に、添付され、この記載の一部分をなす請求の範囲において特徴的に記載されている。本発明およびその動作上の利点およびその使用により達成される特定された目的を良く理解するために、添付図面および本発明の好ましい実施例が示されている説明部分を参照しなければならない。

図面の簡単な説明

図1は本発明のプロセスの基本的なステップを示した

ブロック図である。

図2は、本発明のプロセスを示すために配置された人間の目の写真である。

図3は、多数の解析のスケールで虹彩構造を抽出するためのイメージコンボリューション核として本発明によって使用される直角位相バンドパスフィルタを示す。

図4A乃至4Cは、本発明による直角位相バンドパスフィルタにより虹彩イメージデータがどのようにして虹彩コードビットに変換されるかを示した図である。

図5は“偽者”すなわち異なる虹彩から計算された虹彩コード間の比較に対するハミング距離を示した図である。

図6は統計的な決定理論の公式化を示した図である。

図7は決定基準の操作の理論的な影響を示した図である。

図8は、“オーセンティクス”すなわち同じ虹彩から異なる機会に計算された虹彩コード間の比較に対するハミング距離を示した図である。

図9は、組合せられたオーセンティクスおよび偽者に対するハミング距離を示した図である。

図10はハミング距離分布に対する二項適合を示した図である。

図11は、ハミング距離基準の関数としてのエラーの図である。

図12は、本発明により達成される効率の図表である。

【発明の詳細な説明】

本発明の1実施例は、図1に概略的に示されており、個人の虹彩識別コードを生成し、その後そのコードを使用して識別を行う基本的なステップを示したブロック図を含んでいる。以下、このプロセスを詳細な解析と共に全体的な関係において説明する。

人間の目の虹彩は、筋肉、くし状靱帯の繊維性小柱網、関連組織、血管および色素細胞を含む複雑な構造である。外部的に、それは、収縮溝から生じる半径方向および角度方向の両変化を持つ可視的組織、膠原質のストロマ繊維、フィラメント、蛇行した脈管構造、リング、小窩および小斑点を示し、要するにこれらは特有の“指紋”を構成している。したがって、人間の虹彩の拡大された光学的イメージは個人の同一性を確認し、または承認するためのもっともらしく思われる生体測定学的表示を構成する。さらにこの目的にそれ自身がない、自動識別システムに対してそれを指紋より潜在的に優れたものにして虹彩の特徴は、許容できない危険を伴わずにその組織を外科的に修正することが不可能であること、物理的な環境からのその固有の保護および分離、並びに巧妙さに対する自然の試験を提供する光に対するその容易に監視される生理学的応答を含む。自動識別システムに対する指紋にまさる付加的な技術的利点には、物理的に接触せずに虹彩を光学的に記録することが容易であること、および実物通りの座標系および原点を提供する虹

彩の固有の極座標形状であることが含まれる。

個々の人間の虹彩には十分な自由度または変化があるか否かという本発明まで行われていなかった研究が行われて、はじめて通常の指紋と同じ特異性を提供することが分かった。ビデオイメージから高い信頼性で詳細な虹彩構造を抽出して、コンパクトなコード（イメージデータ寸法に比較して非常に短い長さの）を生成し、高い統計的信頼性で同一性に関する決定を行ない、全て通常の装置の1秒以内の処理時間で行われるために効果的なアルゴリズムが展開されることが可能か否かも確認されていなかった。本発明は、これらの問題を全て肯定的に解決する。

広義において、本発明のシステムは5つのステップで考えられることができる。最初に、図1のブロック10で示されるように解析されるべき目のイメージが解析に適したデジタル形態で獲得されなければならない。その後、イメージの虹彩部分が定められて、分離されなければならない（ブロック12, 14, 16および18）。次に、イメージの決定された領域は、虹彩コードを生成するように解析されなければならない（ブロック20）。特定の虹彩に対して生成された第1の虹彩コードは、基準コードとして記憶されることに注意する必要がある（ブロック22）。続いて、システムはハミング距離を得るために基準コードと与えられたコード（ブロック24）を比較する（ブロック26）ことによって識別を行うために基準コードを使用する。比較により得られたデータはシステムが対象の同一性を設定し、承認し、或は拒否して（ブロック28）、その決定に対する信頼性レベルを計算する（ブロック30）ことを可能にする。プロセスの迅速さはまた単に単一の承認コードを認可することによってではなく、大型データベースにおける徹底的な探索によって受動的な識別を可能にする。

このシステムの実際の適用において、図2に示されているようなデジタル化されたイメージは、瞳孔104を囲んでいる虹彩102を有する目100を示している。白色部分である目の強膜（sclera）部分105は、虹彩102を包囲している。イメージを処理する第1のステップは、瞳孔境界106の位置を決定し、高度の正確さで虹彩102から瞳孔104を分離することである（図1のブロック12）。このステップは、イメージが解析されるたびに、瞳孔の拡張度にかかわらず、虹彩の同じ部分が同じ座標に確実に割当てられるために重要である。瞳孔を形成する虹彩の内部境界は、瞳孔の境界が本質的に円形エッジであることを使用することによって正確に決定されることができる。図2において認められるように、瞳孔104は一般に暗く、一方虹彩102は明るく多様な色彩を有する。しかしながら、例えば暗い虹彩を持ち内部レンズが少し不透明な目において、或は光学的に同軸の（目の中に真っ直ぐな）照明のためにこの関係がしばしば逆になることもあり、後者の場合光は網膜から瞳孔を通して再度外側に

反射される。瞳孔のイメージが明るい別の理由は、角膜からの鏡面反射のためである。瞳孔の境界を発見する一般的な目的の方法は、瞳孔の領域が実際に虹彩より暗いか否かにかかわらず、高い信頼性で機能するように十分に頑強でなければならない。本発明において、真の瞳孔の境界に関する形跡を積分するシステムが開発されており、それは所望の頑強性および正確さを有している。

本発明の方法は、半径が規則的に増大する円に沿って合計した時の輝度の急峻な突然の変化として瞳孔の境界を検出する。この突然の変化は、円が瞳孔の真の中心の近くにその中心を有する場合に、およびその半径が瞳孔の真の半径に一致したときに最大である。したがって、瞳孔を発見するイメージ処理の問題は、最適化問題として公式化されることが可能であり、一連の“複数の環状帯域 (exploding circles)” (規則的に増加する半径) がグリッド上の多数のトライアルポイントの各1つに配置されたそれらの中心座標と共に位置される。各複数の環状帯域に対して、およびその半径の各値に対して、全体的なイメージ輝度がこの円上にある固定された数のポイントに対して合計される。(典型的に128個で

あるこの円上にある一定数のポイントを使用することが、単なる周囲環境による増加による合計輝度の自動的な増加を避ける。) システムは、半径が拡張するのに従ってこの量における最大の変化率を探索する。瞳孔の境界を最も良く説明する候補の円に対して、その半径が瞳孔の境界のものに一致した時に、その周縁で合計された輝度の変化率において突然の“スパイク (spike)”が生じる。このスパイクは、瞳孔の中心座標および半径を共有する円に対してその他全ての円より大きい。このようにして、瞳孔を正確に配置する問題は、円の中心座標 (x_0, y_0) および半径 r の最良の組合せのために3パラメータ空間が探索される最適化問題に変換されている。

本発明の例示的なプロセスを数学的に説明すると、半径が r であり、また中心座標が (x_0, y_0) である円の弧 (ds) に対してイメージ強度 $I(x, y)$ の周回積分を合計し、その後半径 r が増加するに従って r に関するこの量の部分的な導関数を計算することである。この導関数の最大の絶対値は、3つのパラメータ (x_0, y_0, r) の空間に対して探索される。

$$\max_{(r, x_0, y_0)} \left\| \frac{\partial}{\partial r} \oint_{r, x_0, y_0} I(x, y) ds \right\| \quad (1)$$

r に関する部分的な導関数は、雑音に不感にするために滑らかにされた、即ちぼやけさせられた導関数であることができ、それはまた雑音不感性を強めるために割合変化 (周回積分の現在の値によって除算する) に変換されてもよい。この方法はまた周回積分が本質的に外郭のデータを積分するため、固有の雑音不感性を有しているので、画素の輝度における任意の変動的な振幅 (excursion) が平均化する傾向がある。

3パラメータ空間における探索プロセスは、上り傾斜すなわち“ヒルクライミング”によって導かれる。候補の一連の複数の環状帯域が部分的に瞳孔中にある場合、式(1)において定められた量の値は、その中にない別の円に対するものより大きい。同心円の中心が真の瞳孔の中心に近付くと、それだけこの量は大きくなる。同様に、式(1)内の量は適切な半径の円に対して他のものより大きい。このようにして、この方法は反復的な探索プロセスによって3パラメータの最適な組合せを発見することが可能であり、このプロセスでは3パラメータの段階的な変化の大きさは連続した反復ごとに減少していく。3パラメータ空間における最良の方向 (改良率が最大の) に常に移動することによって、また改良率に比例して段階的な変化の大きさを設定し、連続した反復ごとにこれらの段階的な寸法を減少することによって、方法は急速に収束する。通常4または5回の反復の後に、3パラメータの最適な値が1画素以下に決定されている。

(x_0, y_0, r) に対する値は後続的な虹彩解析用の極座標系の原点だけでなく、評価された瞳孔の境界を決定す

る。

瞳孔の境界を発見し追跡するこの効果的な方法は、偽者に対する重要な保護手段も提供する。虹彩パターンに基づく識別システムを克服しようとする1つの明白な方法は、ビデオカメラに別の人間の目の写真を写させるか、或は承認された虹彩イメージを印刷したコンタクトレンズを装着することである。しかしながら、生きている人の目の重要な特徴は、均一の照明下でも1秒に1度または2度瞳孔の直径が小さい振動を絶えず受けていること (“瞳孔動揺”) である。虹彩の写真、または虹彩イメージを印刷されたコンタクトレンズは、経時的にこのような変動を示さない。瞳孔の境界を発見し追跡する上記に説明されたプロセスは非常に速いため、いくつかのイメージを連続的に獲得し、経時的に瞳孔の直径を監視することが可能である。虹彩パターンにおいて瞳孔動揺またはその他の小さい変動が経時的に存在しないことが、生きている人間の虹彩ではなく、写真または偽物が提供された証拠であり、これは侵入を試みていることを示す。生きている人の虹彩と偽物または写真とを区別するこの能力は、瞳孔の境界を決定し追跡する迅速な手段によって可能にされる重要な警備上の利点である。

境界および中心が決定されると、次のステップは、虹彩の外側の境界すなわち縁 (limbus) を定めることであり、ここにおいて縁が強膜に接触する。ここにおいて重要な考慮すべき問題は、瞳孔が常に虹彩内の中心にあるとは限らないことである。右および左の縁に対する半径距離は、20%程度変化するかもしれず、したがって両距

離は適切な虹彩座標系を生成するために計算されなければならない。考慮すべき別の項目は、上および下眼が一般に虹彩の上下の境界を曖昧にし、したがってこれらの領域は虹彩解析から除外されなければならないことである。

瞳孔の境界を正確に決定した同じ“複数の環状帯域”の一般的な方法は、虹彩の外側の境界を発見するために2つの修正をして使用されることができる。最初に、上および下眼の閉じた状態および一般に等しくない左右の縁の距離を仮定すると、この方法は一方が3時であり、他方が9時の水平方向の経線に沿った2つの弧に制限され、各弧が $\pi/4$ ラジアン (45°) を限定している。虹彩の両側のこれら2つの境界までの距離は、別々に測定される。次に、式(1)において最大値を生成することが

$$\max_{r \in [1.5r_0, 10r_0]} \left| \frac{\partial}{\partial r} \int_{\rho=r-\delta}^{r+\delta} \frac{2}{\pi \delta r} \int_{\theta=\phi-\pi/8}^{\phi+\pi/8} I(\rho, \theta) \rho d\rho d\theta \right| \quad (2)$$

ここで r_0 は瞳孔の半径(はじめに計算された)であり、 δ は薄い半径シェル(典型的に $0.1r_0$)であり、 $I(\rho, \theta)$ は極座標 ρ および θ に関して表わしたイメージ強度であり、 ϕ は3時または9時の経線にそれぞれ対応した0または π に等しい。虹彩の外側境界の探索において、瞳孔と虹彩の広範囲にわたる可能性のある相対的直径をカバーする時に、 $1.5r_0$ と $10r_0$ との間の r (瞳孔半径のすなわち1.5乃至10倍)の値に対してこの式を計算することが成功であることが認められている。同様に、式(2)の積分の弧の角度として $\pm \pi/8$ ラジアンを選択することは、パイウェッジが上下の眼を避けるのに有向な水平方向の角度的デリミタであることが判明している。式(2)から計算された結果は、左右の虹彩の境界に正しく対応する虹彩102上の白色点の連続110-1乃至110-rとして図2に示されている。

要約すると、式(1)は虹彩の内側境界すなわち瞳孔の境界を発見する。この式は、種々の中心位置で一連の“複数の環状帯域”の生成し、円に沿って積分された輝度に変化率の最大の絶対値を生じるパラメータ(中心 x_0 および y_0 並びに半径 r)の1つの組合せを反復的に探索する。したがって、円に沿った輝度の周回積分の r に関する部分的な導関数の絶対値の最大が探索される。この探索は、上り傾斜の非常に効率的な反復プロセスで x_0, y_0, r パラメータ空間をカバーする。式(2)は、虹彩の外側境界すなわち白色の強膜が始まる縁を発見する。

(i) 問題を生じさせる可能性の高い上下の眼が閉じた状態、および(ii)虹彩の均一性が瞳孔より低く、式(1)のアルゴリズムにより検出されることができるそれ自身大きな“円形エッジ”を有することを除いて、式(1)と同じ複数の環状帯域のプロセスが有向である。したがって、式(2)は代りに水平方向の経線において一連の“複数の半環状帯域”を指定し(したがって上下の眼を避け)、円に沿ったものではなくパイウェッジ内

できる虹彩内の同心である可能性のある組織のために、瞳孔の境界に対してはじめに使用された周回積分は、縁を探索している時に虹彩細部をぼかす領域積分によって置換される。事実上、いずれかの側の強膜を意味する維持された輝度段階を探索する2つの水平方向の“複数の半環状帯域(exploding pie wedges)”によって“複数の環状帯域”が置換される。前記のように、探索プロセスは、半径が拡張するのに従って積分された輝度の変化率の最大値を発見するものである。輝度積分の増加した領域を補償した後、半径に関するこの導関数の最大値は、虹彩の正しい左右の境界に不変的に対応する。

数学的には、この動作は式(2)を最大にする r の値(瞳孔の中心から右または左側のいずれかまでの距離)を探索することによって実行される。:

の輝度を積分する。したがって、式(2)は、式(1)におけるように周回積分ではなく、半径に関して微分される極座標における領域積分を指定する。

瞳孔境界および縁の位置が設定され、極座標の原点が瞳孔の中心に固定されることにより、解析の一連のゾーンが虹彩の領域に割当てられる。これらは、コードにおける寸法不変を実現するために所定のイメージにおける虹彩の全体的な寸法がどうであって、瞳孔と縁との間の半径距離の固定された直線部分で同心的に決定される。したがって、虹彩に対する極座標系には、その角度および半径の両座標においてディメンションがない。虹彩は瞳孔の反射運動と共に伸縮する樹脂シートとして近似的にモデル化されることができるため、その組織およびマーキングがそれに応じて伸縮する。これらの歪みは、虹彩の内側境界(瞳孔)からその外側境界までの全体的な距離の種々の部分のような、距離を単に区別する半径座標を使用することによって取除かれる。したがって、異なる機会の瞳孔拡張の異なる状態における所定の虹彩は、ほぼ同じ虹彩コードを生成しなければならない。このディメンションのない座標系により与えられる第2の目的は、異なる距離からのイメージ獲得による虹彩イメージ自身の全体的な寸法の相違が計算された虹彩コードを変化しないことである。

瞳孔は一般に虹彩内において水平方向に完全には中心を位置されないため、右および左の縁の直線的組合せに基づくべき区分(fractionation)は角度により余弦曲線的に加重されて算定する必要がある。虹彩上部が上眼により部分的に頻繁に閉じられ、また角膜からの鏡面反射が虹彩下部の部分の曖昧にするため、これらの領域は解析およびコード化から除外される。特定の虹彩イメージに重ねられたこれらの究極的な解析ゾーンは図2に示されている。

特に、解析されるべき虹彩の部分はマップ化され、解

析帯域112に細分される(図2参照)。これらの解析帯域は、特定の虹彩の内側および外側境界が、頻繁に発生するように中心を共有しない場合に、半径座標が少し歪められた特別な極座標系において限定されている。特に、虹彩の付近の角座標に対して、ある点の半径座標 r は、その半径方向の線に沿った、瞳孔境界から強膜までの距離のその部分によって定められる。したがって、角座標が(従来通り) 0° 乃至 360° のディメンションのない量であるため、半径座標もまたこの制限のある座標系においてディメンションがなく、虹彩イメージの全体的な寸法および瞳孔の拡張度と無関係に常に0と1との間にある。したがって、この二重にディメンションのない極座標系は本質的に寸法が不変である(したがって、目からビデオカメラまでの距離の変化を本質的に補償する)。同様に、その座標系はまた虹彩の内側および外側境界の非同心性を本質的に補償する。

解析帯域112の4つの付加的な特別の特徴は、理想的な環状のステレオ型からの多数の虹彩イメージのずれを補償することが必要とされる。最初に、瞳孔104自身はしばしば不規則的な境界を有しているため、最も内側の解析帯域は、瞳孔を完全に除外することを確実にするために瞳孔の平均半径の約1.1倍の半径から始まっている。同様に、虹彩102から強膜105までの転移はさらに不規則的で非円形であるため、最も外側の解析帯域は、虹彩の外側境界までの距離の約80%まで(中間角度で余弦曲線的に加重することにより右および左方向に測定されたように)半径方向に延在している。第3に、虹彩の上下部分の閉鎖を、第4として間接的な照明源が使用された(典型的に下方から)場合に虹彩の一部をカバーする可能性のある鏡面反射を考えなければならない。これらの疑似的な特徴は、最も外側の解析帯域を水平方向の経線に中心を有する2つのセクタに制限することにより、したがって上および下縁によって閉じられる傾向のある領域を回避し、また下方からの照明の鏡のような反射に対して6時の位置付近の狭いノッチを除外することによって除外される。これらの除外された領域は、図2において114aおよび114bとして示されている。上記で限定されたような内側および外側境界の間の距離の固定された半径部分において、解析のために虹彩領域を8つの環状帯域112に分割することが好ましい。

システムは、解析するイメージ領域を正確に限定し、その後図1のブロック20に示されているように識別コードを生成するためにその領域から得られたデータを処理する。従来技術で説明されたシステムとは異なり、本発明は瞳孔の拡張度を制御することに依存しない。そうではなく、虹彩の内側境界から外側境界までの距離のある

部分を単に計測して除したディメンションのない半径座標のために、虹彩組織の所定の部分(piece)は常に同じ位置座標で、虹彩が瞳孔拡張のためにどのように伸張されたか、または伸張されないかにかかわらず同じ解析ゾーンに位置する。このディメンションのない座標系は、虹彩の伸張がゴムシートの伸長として近似できることを利用しているため、マーキングはその座標系が等しい量を伸張されるため、依然として歪みのない形で数学的に取出されることができる。したがって、虹彩の組織は、瞳孔拡張度および虹彩イメージの全体的な寸法にかかわらず、常に本質的に同じ虹彩コードにコード化される。

虹彩の詳細なパターン等のイメージから組織情報を抽出する効果的な方法は、2-Dガボール(Gabor)フィルタ等の直角位相バンドパスフィルタによるコンボリューションである。これらの2-Dフィルタは、主要な視覚皮質において神経において観察される方向および周波数選択的な受容フィールド特性を理解するための足場として、また実際のイメージ解析問題の有効な操作手段として1980年および1985年に本発明者によって示唆された。文献(Daugman, J.氏による1980年のVision Research 20, 847乃至856頁, および1985年のJournal Of The Optical Society Of America, Volume 2 (7), 1160乃至1169頁)を参照されたい。合同する最適フィルタとして、それらは空間的な周波数および2-D位置と共に方向情報に対して同時に最大の分割能を提供し、それらは避けられない不確定性の原理によって指図されるように、これら4つの変数上の共同の不確定性に対して下方の境界をユニークに達成する。これらの特性は、2-Dスペクトル特異性および組織の位置依存性のために、組織解析に対して特に有効である。

2-Dガボールフィルタの集合の2つの要素は、それらの等高線グラフと共に偶数対称性および奇数対称性ウェーブレットプロフィールとして図3に示されている。多数の異なる寸法および位置において限定されたこれらの局所化された波状の2-D関数は、イメージ組織情報をデスクライブし、抽出し、コード化する係数を生成するために未加工の原イメージ画素データによって乗算され、それらのサポートの領域に対して積分される。出願人は、これらが1946年にデニス・ガボール氏によって1次元で説明された初等の関数の部類の2-D普遍化であるため、それらを“2-Dガボールフィルタ”と命名している。文献(Gabor, D氏によるJ. Ins. Elec. Eng., Vol. 9 3, pp. 429-457, (1946))を参照されたい。

本発明において使用された2-Dガボールフィルタは、式(3)のように極座標において限定される:

$$G(r, \theta) = e^{-2\pi i \omega(\theta - \theta_0)} e^{-(r-r_0)^2/\alpha^2} e^{-(\theta - \theta_0)^2/\beta^2} \quad (3)$$

ここにおいて r は半径であり、 θ は半径での角度であり、 ω は角周波数であり、 α および β は ω に依存する変

数である。

上記の解析関数から投影されたフィルタの直角位相

(偶数および奇数対称性) 対の実数および虚数要素の両方が使用される。周波数選択的な直角位相フィルタのマルチスケール自己類似的なファミリーを生成するため、自由なパラメータ α および β が ω に反比例して共に変化する。それらは両直交位相が各位置で使用されるので直角位相にある。それらは、それらの寸法および周波数パラメータの反比例状態が共通の形状を共有している互いのそれら全てを拡張させるので、自己類似的である。 θ_0 および r_0 によって特定されたそれらの位置は、虹彩の解析ゾーンを横切って並んでいる。

虹彩コードが極座標で虹彩にわたって 2-D ガボールフィルタを通過させることによって生成される方法は、図 4A, 4B および 4C に示されている。一番上のトレース

(図 4A) は、特定の半径における虹彩の周囲の 1-D 走査を示し、虹彩の周囲の角座標の関数としてイメージの輝度を表している。(簡単化するために、イメージはここにおいて 2-D 信号ではなく 1-D 信号として表される。) 第 2 のトレース (図 4B) は、特定の寸法および対称性を有し、虹彩の各対応した角座標上に位置されたガボールフィルタの応答を示す。ガボールフィルタのバンドパス特性のために、原入力信号に対するそれらの応答は正または負のいずれかであり、ゼロ付近に中心を置くことに留意しなければならない。虹彩の周りで漸次的に

上方および下方からの照明の結果として生じている原信号の発光における緩やかで非情報的なシフトは、高周波雑音のようにバンドパスガボールフィルタによって除去される。また、バンドパスフィルタはエーリアシングを阻止することができる。エーリアシングはイメージングの分野で知られているように、目的物を完全に定義するために不十分なサンプリング分解能または不適切なフィルタリングにより起こされる不自然な視覚効果、より普通には、目的物の境界に沿い、即ち線に沿いざざざまたは段状縁として見られるものである。

虹彩コードにおける各ビットは、ある寸法、対称性および虹彩上の位置を有する特定の 2-D ガボールフィルタの応答が正であるか、または負であるかによって決定される。このプロセスは、方程式 4, 5, 6 および 7 に示されている。それはコード化される“符号ビット”であるため、この情報は、はじめに説明したように入力イメージで 2-D ガボールフィルタの積を積分したことから結果的に生じた係数の最大桁ビット (MSB) に対応する。

2-D ガボールフィルタの偶数および奇数直角位相対称性の両方を使用し、独立の情報を抽出することは、複素数形態の 2-D ガボールフィルタの対応した実数部分および虚数部分により決定されたビットに対して下付き文字 Re および Im で示されている：

$$MSB_{Re}(r, \theta) = 1 \text{ if } Re \int_{\rho} \int_{\phi} e^{-2\pi i \omega(\theta-\phi)} e^{-(r-\rho)^2/\alpha^2} e^{-(\theta-\phi)^2/\beta^2} I(\rho, \phi) \rho d\rho d\phi > 0 \quad (4)$$

$$MSB_{Re}(r, \theta) = 0 \text{ if } Re \int_{\rho} \int_{\phi} e^{-2\pi i \omega(\theta-\phi)} e^{-(r-\rho)^2/\alpha^2} e^{-(\theta-\phi)^2/\beta^2} I(\rho, \phi) \rho d\rho d\phi \leq 0 \quad (5)$$

$$MSB_{Im}(r, \theta) = 1 \text{ if } Im \int_{\rho} \int_{\phi} e^{-2\pi i \omega(\theta-\phi)} e^{-(r-\rho)^2/\alpha^2} e^{-(\theta-\phi)^2/\beta^2} I(\rho, \phi) \rho d\rho d\phi > 0 \quad (6)$$

$$MSB_{Im}(r, \theta) = 0 \text{ if } Im \int_{\rho} \int_{\phi} e^{-2\pi i \omega(\theta-\phi)} e^{-(r-\rho)^2/\alpha^2} e^{-(\theta-\phi)^2/\beta^2} I(\rho, \phi) \rho d\rho d\phi \leq 0 \quad (7)$$

これらの条件 (式 4 乃至 7) は、虹彩イメージの定められた解析ゾーン内において多数の解析のスケール (パラメータ α 、 β および ω によって設定された) を横切り、またサンプルされた全ての位置 (極座標パラメータ r および θ によって設定された) を横切る虹彩コード中の 2,048 ビットをそれぞれ決定する。その非相関特性 (decorrelating) のためにこのようなコードにおいて非常に著しい量のデータ圧縮が行われることに注目すべきである。元の虹彩イメージは、典型的に 262,000 バイト

(各画素が 1 バイトを必要とする画素の 512×512 アレイ) から構成されているため、著しい虹彩組織がこのマルチスケール 2-D ガボールコードによって 1/1,000 のデータ (すなわち 256 バイト) しか含まない非常にコンパクトな表示に減少されている。

256 バイトの虹彩コードの一例は、図 2 の上部に示されており、それぞれ同心の解析ゾーンにわたって計算さ

れた 8 ビットを有する 256 個の角度列として構成されている。任意の所定のコード中には 2,048 ビットが存在しているが、コードは 2,048 より少ない独立 2 進自由度 (independent binary degrees-of-freedom) を有している。主要な理由は、虹彩中に実質的な半径相関関係が存在しているためである。例えば、所定の筋がかなりの半径距離を伝わり、したがってそれがコードのいくつかの離れた部分に対して影響を与える。第 2 の理由は、相関関係がバンドパス 2-D ガボールフィルタのローパス成分によって誘導されるためである。特に、1 次のフィルタによりコンボリュートされた任意の信号は、フィルタの帯域幅の往復に等しい相関距離を獲得する。

実際の独立自由度数は、非常に多数の虹彩コードにわたってハミング距離の分布 (一致しないビットの部分) を検査し、異なる虹彩から計算されたその他全てのコードと各コードをビット単位で比較することによって評価

されることができる。各ビットは1または0である等しい確率を有しているため、異なる虹彩コードからのビットの任意の対が一致しない確率 $p = 0.5$ が存在する。所定のコード中の各2,048ビットがその他全てのビットと無関係ならば、観察されるハミング距離の分布は、 $p = 0.5$ および $N = 2,048$ の二項分布に等しくなければならない（換言すると、公平に硬貨を繰り返し投上げて、2,048回投上げたうち表の出た回数をカウントすることに等しくなければならない）。異なる虹彩からの2,064個のコードにおいて観察されたハミング距離の実際の分布は、図5に示されている。その標準的な偏差は、 $\mu = 0.502$ の平均の周囲である $\sigma = 0.038$ である。二項分布の標準的な偏差は、 $\sigma = (pq/N)^{1/2}$ で与えられているため、観察されるハミング距離の分布は $N = 173$ ビットの二項分布に等しい。このような二項式の観察された虹彩コードデータに対する実際の適合は、図10において示され、優れた整合を示している。したがって、2,048ビットの虹彩コードには、ほぼ173の独立2進自由度が存在している。

2,048ビットの虹彩コードの複雑さおよびディメンシヨナリティの尺度として $N = 173$ の2進自由度の二項評価を使用して、偶然一致した異なる虹彩からの2つのコードの尤度を計算することができる。2-Dガボールフィルタは正および負のバイアスを有しないため、1または0の任意の所定のビットの優先的な見込み率は等しく、したがって確率は、2つの異なる虹彩コード中の2つの対応したビットが同じである0.5である。虹彩コード内の部分的な相関関係に起因して、虹彩コード間の独立性を仮定すると、2つの異なる虹彩が同じコードを生成する見込み率は 2^{173} 分の1であり、これは 10^{52} 分の1に等しい。

前に記憶されたもの（図1のブロック22）および与えられたイメージから現在計算されているもの（ブロック24）等の任意の2つの虹彩コードを比較する（ブロック26）プロセスは、このようなコード全ての一般的なフォーマットおよび固定された長さのために非常に簡単である。ハミング距離と呼ばれる類似度尺度（metric）が計算され、それは“距離”すなわち2つのコード間の類似度を示す。この測定値は、2つの虹彩コード中の2つの対応したビットが一致しない全回数を単に合計する。したがって、0と1との間の部分として表されるので、全ての2,048の対応したビットの対が一致するため、任意の虹彩コードとそれ自身の厳密なコピーとの間のハミング距離は0となる。任意の虹彩コードとその補数集合（全てのビットが反転される）との間のハミング距離は1である。2つのランダムで独立したビットのストリングの間のハミング距離は、対応したビットの任意の対が不一致の50%の尤度を有しているため、0.5と予測される。したがって、2つの虹彩コードが異なる目から生じた場合、それらのハミング距離は0.5と予測される。そ

れらが異なる機会に同じ目から生じた場合、それらのハミング距離は著しく低いと考えられる。両虹彩コードが同じ写真から計算された場合、それらのハミング距離はゼロに近付く。

虹彩コード間の比較は、対称人物の頭部の可能性のある傾きまたはトーショナルアイローテーションを補償するためにそれらの角度的な軸に沿っていくつかの異なる相対シフトを行わせる。コード比較プロセスにおけるこれらの相対シフトは、図2の左上隅に示されたコードがあたかも巻かれて円筒にされるかのように、互いに関して虹彩コードを横方向にスクロールし、左および右のマージンを結合して、その円筒を回転し、比較プロセスを反復することによって容易に実行される。

虹彩コード間のハミング距離の計算は、基本的な論理演算子のXOR（排他的オア）の使用により非常に簡単にされる。1対のビットAおよびBは、 $(AB) = (00), (01), (10)$ および (11) のちょうど4つの可能性のある組合せを有することができる。2つの入力上のXOR演算子は、その入力のうち1つだけが1に等しい場合に1と定められ、そうでない場合はそれらのXORは0である。したがって、ビットAおよびBの4つの可能性のある組合せに対して与えられた例において、それらのXORの対応した値： $(A \text{ XOR } B) = 0, 1, 1, 0$ である。したがって、明らかにXORは、それらの値が何であれ任意のビットの対の間の不一致を検出するために使用されることができる。

2つの対応した虹彩コードビットのXORが1に等しい全回数を合計し、このような比較の全回数（虹彩コード中のビットの数である）で除算することは、2つのコード間のハミング距離を測定することに等しい。その代わりとして、この量はまた2,048の次元2進空間における2つの虹彩コードベクトル間の差ベクトルの、正規化された2乗された長さ、すなわち2乗ノルムとしてデスクライブされてもよい。これらの公式は全て虹彩コード比較に対して同じ距離を生成し、それらは2つの虹彩コードが同じ虹彩すなわち同じ人物から得られた計算された確率への直接的な変換を行う。

所定の虹彩の表示を、特定の個人に属していると認識し、或は彼女または彼が偽者であると決定する問題は、統計的なパターン認識および決定理論の構成内で公式化されることができる。

パターン認識におけるイエス／ノー決定は、所定のパターンこれら2つの各場合に対して問題になっているカテゴリの真のインスタンスであるか、またはそうではないという4つの可能性のある結果を有し、正しいまたは正しくないという決定が行われる。これら4つの結果は通常成功、失敗、誤警告、および拒否補正と呼ぶ。本出願において、4つの可能性のある結果は、本人の承認（AA）、偽者の承認（IA）、本人の拒否（AR）および偽者の拒否（IR）である。決定実行アルゴリズムの目的

は、AAおよびIRの尤度を最大にし、IAおよびARの尤度を最小にすることである。これら4つの結果の確率における対単位の妥協は、特定の適用におけるそれらの関連した費用および利点を反映するように操作されていることができる。

不確かな条件での決定に対する公式は、図6に示されている。ハミング距離の所定の尺度すなわち2つの虹彩コード間の不一致ビットの部分は、横軸上の点を構成する。尺度は、2つの処理のうち一方をデスクライブしたランダム変数とみなされ、2つの重なった確率分布によって表される。ランダム変数がデスクライブするのは、これら2つの分布のどちらの優先度かは分かっていない。基準は図6中の垂直な点線によって示されているように選択され、この基準より小さいハミング距離は全て“本人”分布に属していると判断され、一方のこの基

準より大きい全てのハミング距離は“偽者”分布に属していると判断される。これら2つの分布 $P_{Au}(H)$ および $P_{Imp}(H)$ は、同じ虹彩の2つの比較から生じた特定の計測されたハミング距離(“本人”)の、または異なる虹彩の2つの比較から生じた特定の計測されたハミング距離(“偽者”)の確率密度 H をそれぞれ提供する。

4つの結果、AA、IA、ARおよびIRは、選択された基準および2つの基本分布の統計パラメータによって完全に決定される確率を有している。決定ルールが、

ハミング距離<基準ならば、承認

ハミング距離>基準ならば、拒否

である場合、4つの可能性のある結果の確率は、選択された基準 C の各側の2つの確率密度関数 $P_{Au}(H)$ および $P_{Imp}(H)$ の下での面積に等しい：

$$P(AA) = \int_0^C P_{Au}(H) dH \quad (8)$$

$$P(AR) = \int_C^1 P_{Au}(H) dH \quad (9)$$

$$P(IA) = \int_0^C P_{Im}(H) dH \quad (10)$$

$$P(IR) = \int_C^1 P_{Im}(H) dH \quad (11)$$

これら4つの確率は、図6において4つの陰影線領域によって表されている。

4つの確率は、合計して1にならなければならない2つの対、および不等式によって表わされる2つの対に分けられることが明らかである：

$$P(AA) + P(AR) = 1 \quad (12)$$

$$P(IA) + P(IR) = 1 \quad (13)$$

$$P(AA) > P(IA) \quad (14)$$

$$P(IR) > P(AR) \quad (15)$$

2つハミング距離分布 $P_{Au}(H)$ および $P_{Imp}(H)$ が最小の重複を有している場合、2つのエラー率 $P(A)$ 、 $P(IR)$ が最小にされることも明らかである。これは、それらの2つの平均をもっと離すことによって、或はそれらの変数を減少することによって、若しくはそれらの両者によって達成されることができる。2つの分布は、簡単化のために図6に示されたような同じ形態および変数を一般には有しないことに留意すべきである。

個人間の区別および認識を行う生体測定学的表示方法の有効性および識別力は、これら2つの分布の間の重複の量に関連して限定されることができる。明らかに、重複がなければ、100%正しい決定を行うことが可能である。反対に、重複が多くなると、使用される決定基準にかかわらず、それだけエラーの割合は高くなる。

上記の式(8)乃至(11)で決定基準 C を特定することにより、異なる適用に最も適した異なる決定方法を採

用することが可能になる。例えば、現金自動預金・支払い機において銀行口座へのアクセスを制御するとき、ARRが0よりかなり高いことを許すことは取引関係にとって悪く、たとえそれが高いIARを黙認することを意味するにしても、結局偽者を受入れるコストは、最悪の場合でもATMの現金引出し制限である。他方において、軍事または大使館セキュリティシステムでは、恐らく偽者に対して許容されるのは100万に1回だけという厳しさの、はるかに用心深い基準が必要とされる。この場合、このような基準が高いARR(別のスクリーニングに対して拒否された本人の割合)の許容を要求してもそうである。

図7には、異なる決定方法を実行するための決定基準 C の操作が概略的に示されている。理論的な本人承認率すなわち $P(AA)$ が、図6に示されたような決定基準 C に対して異なる選択によって決定された点の軌跡として理論的な偽者承認率すなわち $P(IA)$ に対して示されている。これら2つの図面は、決定問題の性質を明瞭にするための理論的なものに過ぎない。図示されているように、それらはこの生体測定学的認識システムに対して実際に存在するものよりはるかに大きい不確かさを示している。

式(14)は、図7に示された方法の曲線が常にこの確率空間において対角線の上に位置することを示す。一般に、左上隅にできるだけ近接した点を生成する決定方

法を使用することが好ましい。これは、その理想的なものに達することが全ての本人が承認され、一方全ての偽者が拒否されたことを意味するためである。明らかに、過度に用心深いまたは過度に寛容な方法は、2つの対角線の端部に向かって曲線に沿ってスライドすることに対応し、これらの先端において全ての対称、本人および偽者は一様に例外なく拒否されるか（左下）、例外なく承認されるか（右上）のいずれかである。したがって、明らかに、図7の識別力是对角線に沿った任意の箇所でゼロであり、それはこの空間の左上隅において1に等しい。したがって検出方法の全体的な力は、寛容-用心深い方法曲線に沿って決定基準を置くために選択された場所にかかわらず、対角線と方法曲線中の湾曲部を結合したラインセグメントの長さ、すなわち“弓”中の“矢”の長さによってゲージ化される。

信号処理および統計的な決定理論の構成内で生体測定学的識別問題を公式化した後、人物の虹彩による彼等の識別可能度を評価する。

図5には、異なる虹彩の2,064対において計算されたハミング距離の分布（同じ人物からの対がないため“偽者”と表示された）が示されている。予測されるように、異なる虹彩に対する2,048ビット（256バイト）コード中の任意のビットは一致または不一致の等しい確率を有しているため、平均ハミング距離は0.5に近かった。ハミング距離の分布は、予測された値付近に集中して集積化された。実際の平均値は標準偏差 $\sigma = 0.038$ で $\mu = 0.497$ である。

図8は異なる時間に得られた同じ虹彩の異なるイメージの1,208対において計算されたハミング距離の分布（“本人”）を示す。理想的には、イメージが真に同一ならば、これらのハミング距離はゼロでなければならない。しかしながら、凝視角度の差、部分的な瞼の閉鎖状態、角膜からの鏡面反射、および瞳孔の相対的な収縮によってコード化された構造における若干の差が生成される。本人分布は、標準偏差 $\sigma = 0.0435$ で $\mu = 0.084$ の平均を有している。

異なる機会の人物の頭部が傾斜変化する可能性があり、またその窩内の眼球の周期的両眼共同運動（トーションロテーション）のために、異なる相対方向の範囲にわたって全ての虹彩コード比較を実行することが必要である。1組のこのような比較から得られた最良一致だけが、類似度の尺度として保持される。このような“ n 個の相対方向における最良のもの”試験は常に最も低いハミング距離を選択するため、本人および偽者の両比較に対して、これらの分布の両方が左方向にシフトされ、そうでない場合よりも狭くされる。もちろん、これは決定作業の性質に影響を与えず、それは2つの分布の形態に関するいずれの仮定にも基づいていない。しかし、同一の目の異なるイメージ間の一致の程度は関連性のない虹彩に対するコード間の一致よりも、いくつかの

候補の相対方向においてそれらを比較することによって得られる利点が多いため、それは全体的な決定特性を改良する。

図8において認められる本人分布は、7個の相対方向における最良のものにより得られた。図9は偽者に対する対応した分布と共にこの分布を示し、図5に対して使用されたものと同じであるが、同じ新しい7個の相対方向における最良のものを使用した2,064の関連性のない虹彩コードの同じ組を比較している。これら2つの分布は、実験的な重複を有しない。図10は、パラメータが観察された実験的な分布の対の平均および変数に一致するように適合された理論的な生体測定学的分布によって適合された柱状図（ヒストグラム）の同じ対を示す。正体測定学的形態は数学的に適切であり、ベルヌーイ（硬貨投げ）の試行の統計的シーケンスとしてコード比較プロセスの性質を与えられている。それによって、虹彩パターン認識の問題は本質的に独立性の統計的な試験に変形される。虹彩コードビット間の排他的オア試験は、2つのコードシーケンスが独立したランダムプロセスから生じているという仮定を試験する。統計的な独立性のこの試験は、同じ目から生じた2つのコードに対してほぼ確実に失敗するが、異なる目から生じた2つのコードに対してはほぼ確実に成功する。

図9において認められる2つの実験的な分布は重複を有せず、事実上0.25乃至0.35のハミング距離の範囲の点は観察されず、十分に大きいデータベースが研究されていたならば、理論的にはある重複が2つの分布の間に存在することになるであろう。図10において重ねられた理論的な生体測定学的曲線の適合された対は、観察が無制限の回数行われる場合にエラー率を評価する方法を提供する。これらの重複適合分布は、統計的な決定実行の基本構成を導いた図6を考慮されなければならない。式（8）乃至（11）で定められたように、人物の同一性または非同源性の確率および予測されるエラー率は、任意の選択されたハミング距離決定基準の各側のこれら2つの分布の下で累積積分として計算されることができる。1,208の対にされた比較の観察された集団において、誤って受認している偽者（IAR）および拒否している本人（ARR）のエラー率は、ハミング距離基準の関数として図11にプロットされる。このグラフは、基準の変化によって操作可能なタイプI（IAR）とタイプII（ARR）のエラー率間の妥協を明らかにしている。それらの理論的な交差点は、約0.321のハミング距離基準に対して生じ、その点において誤った承認および誤った拒否の両方の確率は131,000分の1である。例えば偽者承認の機会がほぼ200万分の1である0.26のハミング距離のようなもっと用心深い決定基準を要求した状況において、図11は、本人を正しく承認する率が依然99.96%より高いことを示している。破線の曲線は、図10に認められる $P_{Au}(H)$ および $P_{Imp}(H)$ に対して適合された生体測定

学的分布を使用して、式(7)および(8)にしたがって計算された理論上のエラー率である。

この統計的なパターン認識タスクに対してははじめに展開された生体測定学的構成により、人物の虹彩表示に基づいて彼等の同一性と一致したまたは一致しない任意の決定に関連した信頼性レベルを計算することができる。特に、例えば前に“エンロールされた”ものおよび与えられているもの等の2つの虹彩コードが比較され、それらのハミング距離が測定された場合、この寸法以下のハミング距離が2つの異なる虹彩から偶然生じた見込み率を計算することができる。この確率が十分に小さい場合

$$P(HD \leq C) = \sum_{m=1}^{CN} \binom{N}{m} (p)^m (q)^{N-m} \quad (16)$$

式(16)は、異なる虹彩に対するコード間のハミング距離HDが所定の決定基準Cより偶然小さくなる確率を示す。これは、任意の所定の決定基準に対して誤った承認の機会に対する見込み率は何かを決定させる。(スターリンの近似計算は式16を評価するために必要な大きい階乗の評価を可能にする。)図12に表わされているように、これらの理論上の見込み率は、0.30のハミング距離基準に対しておよそ2.4百万分の1であり、その見込み率は0.26以下の基準に対して急速に“プラネタリイレベル”(莫大な)に達する。明らかに、このような起こりそうにないエラーはこのような基準を使用した場合、既存のデータベースでは決して生じなかった。事実、2,064の虹彩コード比較の中で観察された偽者承認率は、この点で理論上の本人拒否は約100万分の1である(図12の下行)0.35の高さのハミング距離基準に対して既にゼロであった。

本発明の生体測定学的表示セキュリティシステムのパワーの最終的なゲージは、同じ虹彩の異なる画像の中において認められる典型的または平均ハミング距離と関連した計算された信頼性レベルである。図8および9の柱状図において明らかなように、同じ虹彩から生成された2つの虹彩コード間の平均ハミング距離は0.084であった。この典型的な場合に対して、個人を本人として承認する決定に対する信頼性レベルは、本当に析はずれに大きい。特に、この平均寸法以下のハミング距離が偽者から生じる式(16)による見込み率は 10^{31} 分の1である。

本発明のこの実施例によって実行される解析は、データの256バイト(2048ビット)の識別コードを生成する。この数は、最適化された処理特性と結合された信頼性の高い識別コードを生成することが認められている。虹彩コードは、固定された長さの普遍的な理論上の数学的コードに全て異なる虹彩をマップ化する。これはコード比較が、比較的“特徴のない”虹彩(恐らく低いコントラストイメージの結果のために)と濃い可視組織でイ

にのみ、その人物は本人として承認される。

決定と関連した信頼性レベルはN個の独立した2進自由度の可能性のある全ての組み合わせ:

$\binom{N}{m}$ を合計することが必要であり、これにはこのような事象の確率倍の、 $m \leq CN$ ビットの不整合(結果的に不整合の部分C以下のハミング距離HD)が存在し、Pを1対のビットが整合しない確率とし、qをそれらが整合する確率とすると:

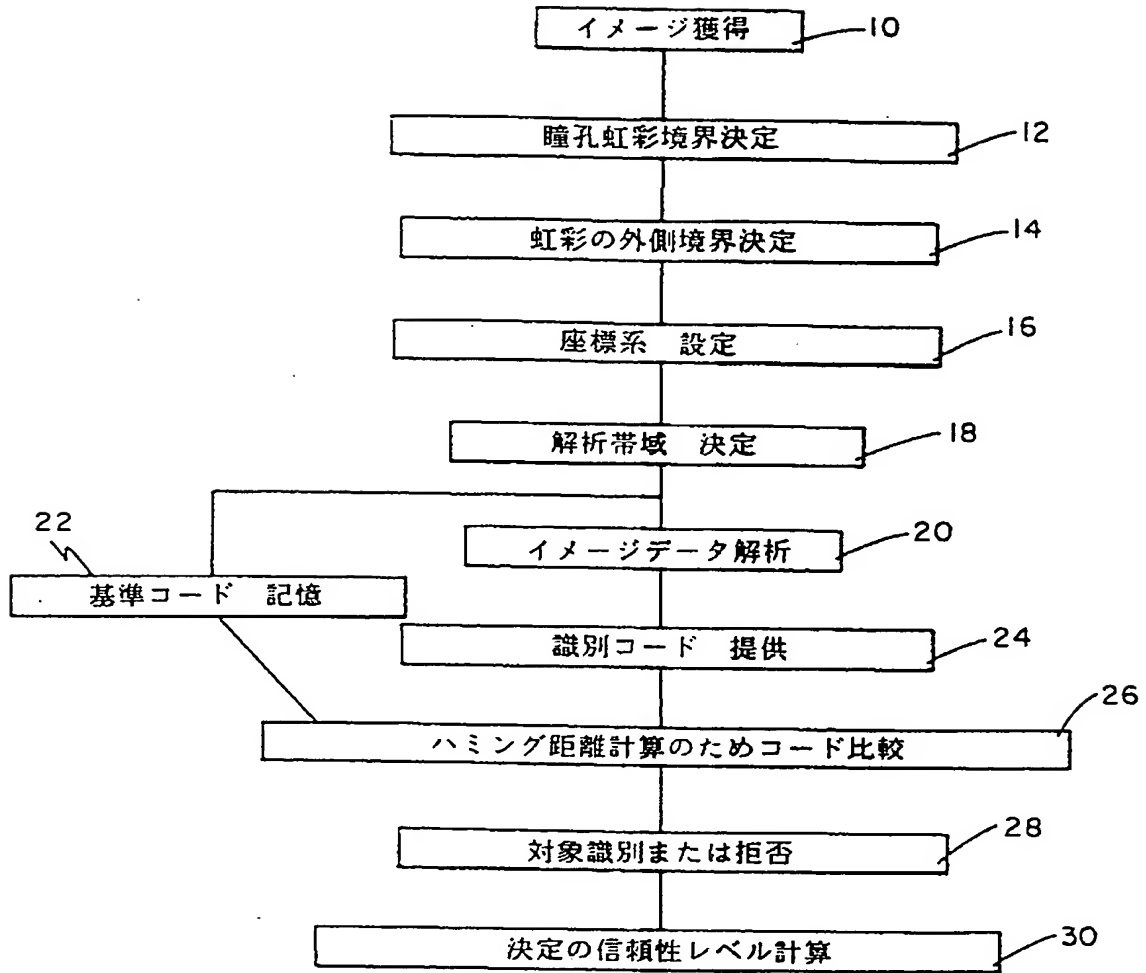
メージ化されたものとの間でさえ非常に効率的に行われることを可能にする。

比較プロセスは、XORゲートに基づいた簡単なハードウェア構成に直接役立つ。XORゲートは、3つのトランジスタだけから構成されているため標準的な半導体チップにおいて利用できる。例えば、74F86と命名された標準的なICは、80メガヘルツで動作することができる4つの独立したXORゲートを含み、僅かな費用で入手できる。記憶された虹彩コードの大きなデータベースを通して徹底的な探索と同様に、2つの虹彩コード間の任意の比較は、非常に高速かつ本質的に並行して実行されることができる。例えば、74F86ICの32×32アレイを含んでいる回路板は、個人がこれらの人物のうちの任意の1人であるか否かを信頼して確立するために、1秒内に160万個の前に記憶された虹彩コードの集団に対して“提出している”虹彩コードを徹底的に比較することができる。

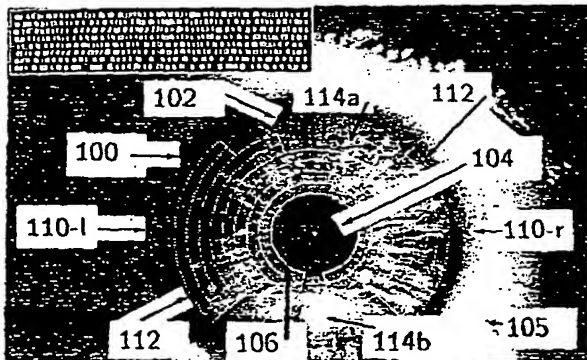
コード中の各ビットは2進ランダム変数と考えられることができるため、生体測定学的統計学の理論は偶然に一致した2つの異なる虹彩コード中のビットの任意の所定の部分の確率を評価することに適用されている。これは、統計的な決定理論を使用して全ての決定に対して信頼性レベルの対象体の計算を可能にする。パターン認識問題がここにおいてディメンションのない座標系における解析のマルチスケールに対して計算されたガボール係数の極性に関する独立性の統計的な試験に変形されている限り、本発明の全体的な理論的な基礎は、特有の信号処理方法の統計的決定理論との合成と考えられることができる。

上記に説明された実施例は、単なる適用例に過ぎないことが理解される。当業者は、本発明の原理による本発明の技術的範囲内のその他の実施例を容易に認識するであろう。

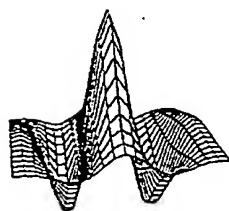
【第1図】



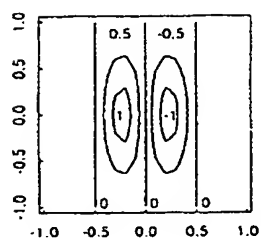
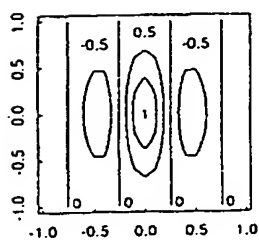
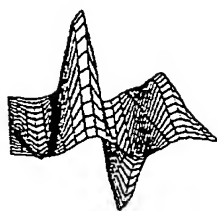
【第2図】



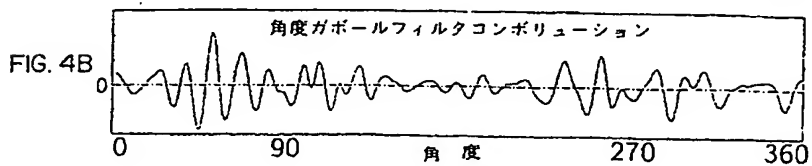
【第3A図】



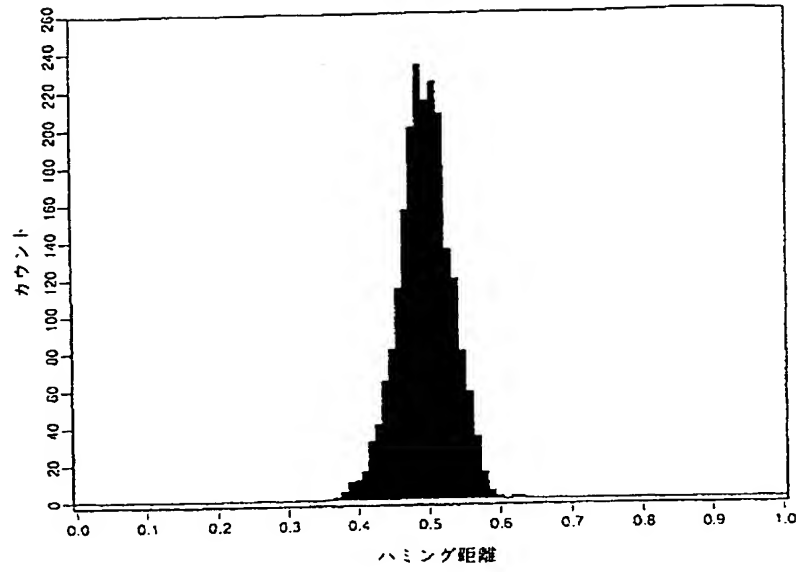
【第3B図】



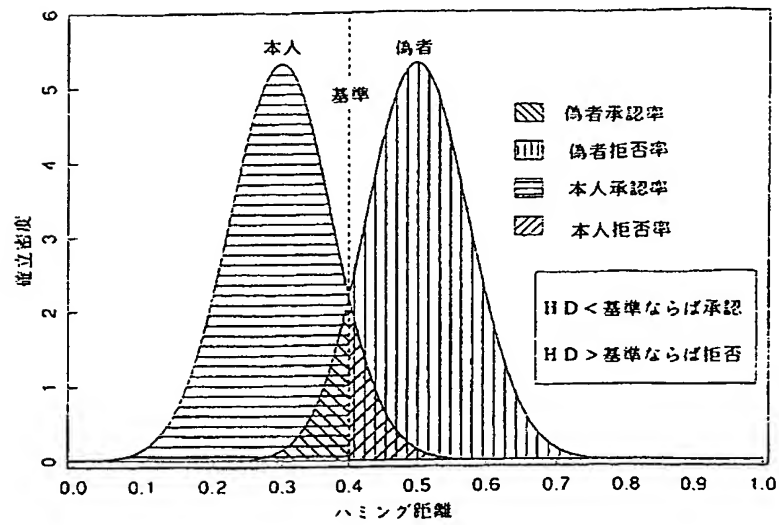
【第4図】



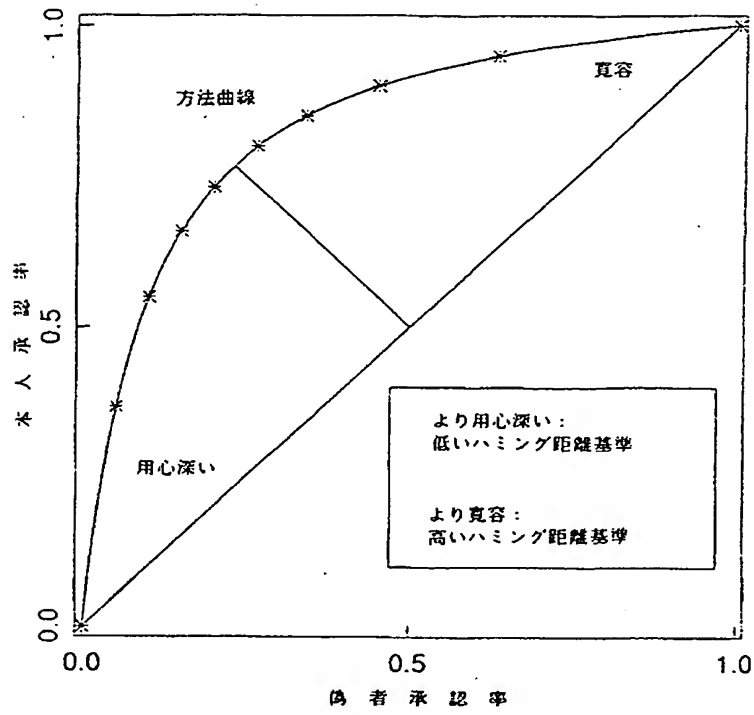
【第5図】



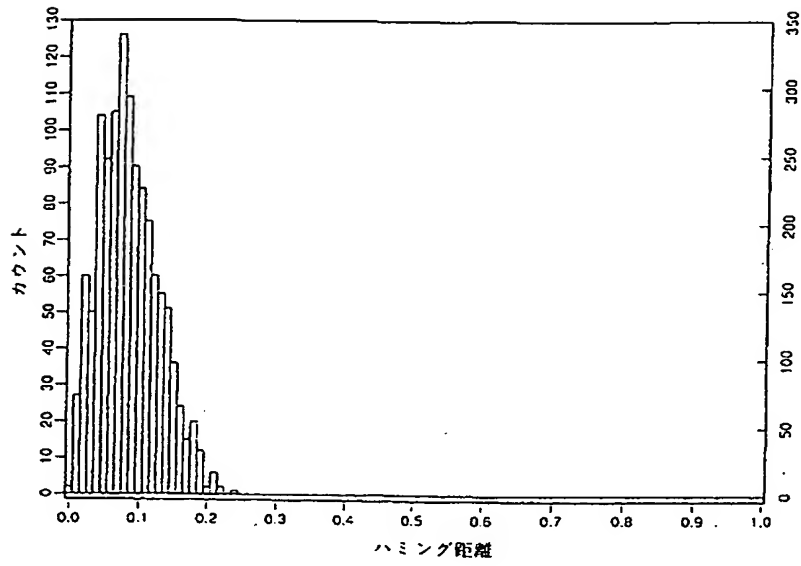
【第6図】



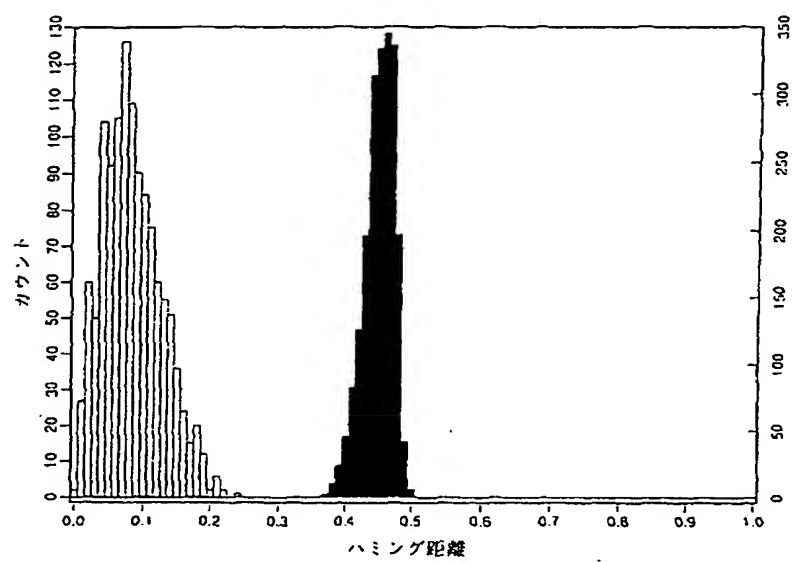
【第7図】



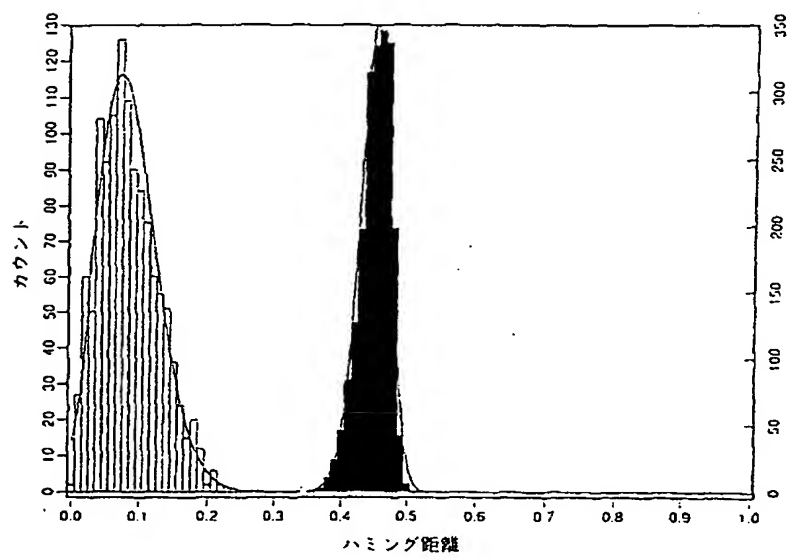
【第8図】



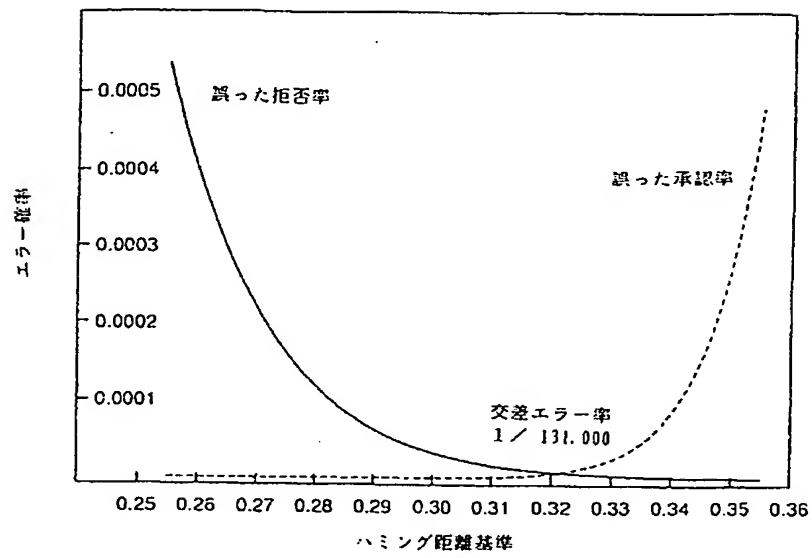
【第9図】



【第10図】



【第11図】



【第12図】

HD基準	誤った承認の見込み	誤った拒否の見込み
0.25	1 / 13.5 (10億)	1 / 1,490
0.26	1 / 2.04 (10億)	1 / 2,660
0.27	1 / 339 (百万)	1 / 4,850
0.28	1 / 60 (百万)	1 / 9,000
0.29	1 / 12 (百万)	1 / 17,100
0.30	1 / 2.4 (百万)	1 / 32,800
0.31	1 / 603,000	1 / 64,200
0.32	1 / 151,000	1 / 128,000
0.33	1 / 39,800	1 / 260,000
0.34	1 / 11,500	1 / 536,000
0.35	1 / 3,630	1 / 1.12 (百万)

フロントページの続き

(58)調査した分野(Int. Cl.⁷, DB名)

A61B	5/10
G06T	7/00
G06K	9/00 - 9/82